Technique d'identification algébrique pour la caractérisation de la propagation des ondes de structures complexes dans des conditions stochastiques

**Résumé**

Les structures acoustiques complexes telles que les structures composites, les matériaux viscoélastiques, les matériaux poreux, les méta-structures et les structures périodiques sont largement utilisées dans l'aérospatiale, l'automobile et le génie civil pour leurs capacités de réduction du bruit et des vibrations. Ces dernières années, le développement de techniques d'identification des nombres d'onde a fait l'objet d'une attention croissante, car les nombres d'onde extraits peuvent fournir une grande quantité d'informations utiles sur les structures, telles que les relations de dispersion, les caractéristiques de propagation de l'énergie, les phénomènes de couplage d'ondes multimodales, la perte de transmission du son, la densité du modèle et le comportement anisotrope des structures. En outre, les nombres d'ondes identifiés peuvent être appliqués au calibrage des modèles, à la surveillance de l'état des structures, à l'estimation des paramètres mécaniques, à la conception et à l'optimisation des structures dans le domaine vibroacoustique.

Les techniques d'identification du nombre d'onde sont largement utilisées pour identifier la caractérisation de la propagation des ondes des structures industrielles car elles ne nécessitent que la réponse en fréquence de la structure comme paramètres d'entrée. Néanmoins, une incertitude réaliste, telle que la distorsion de la grille, la déformation structurelle, les imperfections aléatoires des matériaux manufacturés, l'erreur d'opération, le bruit du signal, l'incertitude d'échantillonnage et la périodicité structurelle inconnue des structures périodiques, doit être inévitablement prise en compte pendant le processus d'analyse inverse. Ces conditions stochastiques peuvent conduire à la génération de données expérimentales de mauvaise qualité, ce qui rend nécessaire une méthode fiable d'identification du nombre d'onde basée sur l'expérience.

Dans cet objectif, cette thèse propose plusieurs méthodes d'identification du nombre d'onde basées sur le cadre de l'identification algébrique des paramètres: Algebraic Wavenumber Identification (AWI) avec deux solveurs pour les signaux unidimensionnels, Algebraic K-Space Identification (AKSI) pour les signaux bidimensionnels, et Algebraic K-Space Identification in the Cartesian coordinates system (AKSI-C) pour les signaux multidimensionnels. Les méthodes proposées permettent l'extraction du nombre d'onde dans les quatre scénarios suivants: 1) niveau élevé de bruit du signal; 2) petite perturbation causée par des incertitudes sur les coordonnées des points d'échantillonnage; 3) périodicité structurelle inconnue; 4) échantillonnage non uniforme. En général, ces méthodes commencent par établir une équation différentielle linéaire dans le domaine du nombre d'onde en utilisant la méthode des dérivées algébriques et les transformées de Laplace. Ensuite, l'équation différentielle est convertie dans le domaine spatial en utilisant la transformée de Laplace inverse, ce qui conduit à une nouvelle équation de régression linéaire avec des intégrales multiples. Enfin, le nombre d'onde complexe est estimé par la méthode des moindres carrés.

Les bonnes performances des méthodes proposées découlent des caractéristiques suivantes: 1) les intégrales multiples agissent comme un filtre, ce qui réduit l'influence des incertitudes sur le processus d'extraction; 2) l'introduction de la transformée de Laplace traite le signal comme une fonction de signal continue, ce qui permet de surmonter les limites de l'échantillonnage périodique; 3) l'ensemble du processus d'estimation ne nécessite que la résolution de plusieurs équations linéaires simples, ce qui réduit le coût de calcul; 4) un intervalle d'échantillonnage plus petit peut améliorer la précision numérique des intégrales multiples, ce qui augmente encore la robustesse des méthodes proposées face aux incertitudes.

L'efficacité des méthodes proposées a été validée numériquement et expérimentalement en les comparant à d'autres méthodes connues dans la littérature d'identification du nombre d'onde dans différentes conditions stochastiques. L'avantage supplémentaire de ces travaux de thèse est que les méthodes proposées ont été appliquées pour décrire le comportement dynamique et caractériser la propagation des ondes de différentes structures complexes. De plus, leurs applications ultérieures dans l'optimisation structurelle, l'estimation des matériaux, la propagation des ondes dans les structures courbes, et le phénomène de propagation des ondes couplées ont été mises en œuvre. Tous les résultats montrent que les méthodes proposées peuvent être de bons candidats pour réaliser une analyse in-situ du comportement dynamique et un choix de conception optimale de structures industrielles.

**Mots clés:** Identification des paramètres algébriques, nombre d'onde, espace k, facteur de perte d'amortissement, propagation des ondes, condition stochastique, structures complexes, signaux multidimensionnels, optimisation structurelle, estimation des paramètres mécaniques.

**Algebraic identification technique for wave propagation characterization of complex structures under stochastic conditions**

**Abstract**

Complex acoustic structures such as composite structures, viscoelastic materials, porous materials, meta-structures, and periodic structures are widely used in aerospace, automotive, and civil engineering for their noise and vibration reduction capabilities. In recent years, the development of wavenumber identification techniques is receiving more and more attention since the extracted wavenumbers can provide a large amount of helpful information about structures, such as dispersion relations, energy propagation characteristics, multi-modal wave coupling phenomena, sound transmission loss, model density, and anisotropic behavior of the structures. In addition, the identified wavenumbers can be further applied to model calibration, structural health monitoring, mechanical parameter estimation, structural design, and optimization in vibroacoustic fields.

Wavenumber identification techniques are used extensively to identify wave propagation characterization of industrial structures because it only requires structural frequency response as input parameters. Nevertheless, realistic uncertainties, such as grid distortion, structural deformation, random imperfections in manufactured materials, operation error, signal noise, sampling uncertainty, and unknown structural periodicity of periodic structures, require to be inevitably taken into account during the inverse analysis process. These stochastic conditions can lead to the generation of poor-quality experimental data, raising the need for a reliable experiment-based wavenumber identification method.

To this end, this conducted thesis proposes several wavenumber identification methods based on the algebraic parameter identification framework: Algebraic Wavenumber Identification (AWI) with two solvers for one-dimensional signals, Algebraic K-Space Identification (AKSI) for two-dimensional signals, and Algebraic K-Space Identification in the Cartesian coordinates system (AKSI-C) for multidimensional signals. These proposed methods allow wavenumber extraction under the four scenarios: 1) high level of signal noise; 2) small perturbation caused by uncertainties on sampling points’ coordinates; 3) unknown structural periodicity; (4) nonuniform sampling. Generally, these methods begin by establishing a linear differential equation in the wavenumber domain using the algebraic derivatives method and Laplace transforms. Then the differential equation is converted into the spatial domain using the inverse Laplace transform, leading to a new linear regression equation with multiple integrals. Finally, the complex wavenumber is estimated by the least squares method.

The good performance of the proposed methods stems from the following features: 1) the multiple integrals act as a filter, which reduces the influence of uncertainties on the extraction process; 2) the introduction of the Laplace transform treats the signal as a continuous signal function, overcoming the limitations of periodic sampling; 3) the whole estimation process only requires several simple linear equations to be solved, thus reducing the computational cost; 4) the smaller sampling interval can improve the numerical accuracy of the multiple integrals, thus further increasing the robustness of the proposed methods to uncertainties.

The effectiveness of the proposed methods has been validated numerically and experimentally by comparing them with the other popular wavenumber identification methods under different stochastic conditions. The additional benefit of these works is that the proposed methods have been applied to describe the dynamic behavior and characterize the wave propagation of different complex structures. Moreover, their further applications in structural optimization, material estimation, wave propagation in curved structures, and the coupled wave propagation phenomenon have been implemented. All the results show that the proposed methods can be a good candidate for achieving an in-situ analysis of the dynamic behavior and optimal design choice for industrial structures.

**Keywords:** Algebraic identification technique, wavenumber, k-space, damping loss factor, wave propagation, stochastic conditions, complex structures, multiple-dimensional signals, structural optimization, mechanical parameter estimation.